

풍력발전용 3MW급 외부회전자형 영구자석 동기발전기 설계

김태훈*

Design of 3MW Class Outer Rotor Type PMSG for Wind Turbine

Taehun Kim*

Abstract

Over the last decade, wind turbine industry has rapidly increased around world. These days many parts of the wind generators are induction generator. But it has some problems such as gearbox failure, rotor excitation and maintenance. Thus many manufacturers are considered permanent magnet synchronous generator named PMSG and direct drive. PMSG uses NdFeB magnet has many the advantage compare with induction generator. In this study, 3MW class outer rotor type PMSG for wind turbine is proposed. The generator features 2.6m stator outer radius, 1200mm stator length, 81 pole pairs, 14 rated rpm, 42kN/m² shear force density and 94.2% efficiency. Design and analysis generator using FEM program. Then calculate and derivate no load voltage, losses, conductor temperature. To reduce total harmonic distortion and cogging torque, the stator is applied the stator skewing. And to evaluate the designed generator, compare with other generators by active mass per rating torque and torque density.

Key words PMSG(영구자석동기발전기), Direct drive(직접구동), outer rotor(외부 회전자)

(접수일 2010. 12. 1, 게재확정일 2010. 12. 17)

* POSTECH, 풍력특성화대학원

■ E-mail : dasari8@postech.ac.kr ■ Tel : (054)279-0583 ■ Fax : (054)279-0589

Nomenclature

V_{line} : line to line voltage, V_{rms}
 V_{phase} : phase voltage
 r_g : stator outer radius
 l_s : stator stack length
 F_d : shear force density, shear stress

subscrip

PMSG : permanent magnet synchronous generator
DFIG : doubly fed induction generator
THD : total harmonic distortion

1. Introduction

최근 지구 온난화와 에너지 고갈 같은 전 세계적 환경 문제를 해결하기 위해서 신재생에너지원의 개발과 연구가 증가하고 있다. 특히 풍력발전 산업은 최근 10년 사이 급속도로 성장하였다. 풍력발전기의 설치 장소가 점차 육상에서 해상 갈수록 발전기의 신뢰성과 유지 보수비용 문제가 대두되고 있다. 최근 Siemens와 GE, 심지어 Vestas 까지 해상용 풍력발전기를 영구자석 동기발전기 방식으로 개발하였다. 이처럼 기어형 풍력발전이 지배적인 현재 시장에서 직접 구동 혹은 영구자석 발전기에 대한 관심이 높아지고 시장 점유율 또한 늘어가고 있다.

본 연구에서는 풍력발전용 3MW급 영구자석 동기발전기를 설계한다. 해상풍력발전에서 3MW급 발전기가 경쟁력이 있다고 판단하였으며, 발전기 유지보수와 신뢰도 측면에서 기어형보다 우수한 직접 구동형 발전기를 선택 하였다. 본 논문에서는 발전기 설계 절차를 제시하고 그 절차에 따라 설계한 발전기의 전기자기적 해석과 열분석을 수행한다. 또한 설계한 발전기와 다른 발전기와의 비교를 통한 평가를 하고자한다.

2. Design of outer rotor type PMSG

2.1 설계 요구 조건

예비 설계 단계로 발전기 형식과 용량, 외형 치수, 극 수 등을 산정한다. 다음으로 FEM 프로그램을 이용하여 모델링을 한 후, 해석을 위해 격자를 생성하고 해석을 수행한다. 해석 결과를 분석하여 발전기의 전기적, 기계적 특성을 계산한다. 계산 결과와 목표 값을 비교하여 최적의 값을 찾는다.

발전기 형식은 외부 회전자 방식의 영구자석 동기발전기로 선정하였다. 또한 발전기 용량은 3MW로 정하였다. 이는 앞으로 해상 풍력에서 경쟁력이 있을 것이라 판단되어서다. 현재 상용화되었거나 개발 중인 3MW급 풍력발전기를 Table 1에 정리하였다. 전압은 660V에서 690V 사이로 정하였다. 이는 전력변환장치의 스위칭 소자 정격을 고려한 것이다. Table 1에 나타난 자료와 참고문헌^(1,2)을 참고하여 해상용 3MW급 풍력발전기 설계를 위한 설계 요구 조건을 정하였다.

Table 1. 세계 주요 3MW 발전기

제조사	발전기	회전속도	전압
Vestas	PMSG	13.8	N/A
Siemens	PMSG	6~16	690
Acciona	DFIG	13.2	12000
Enercon	EESG	4~14.5	N/A
Winwind	PMSG	5~16	N/A
Doosan	PMSG	15.7	690
The Switch	PMSG	N/A	690
Scanwind/GE	PMSG	11~22	690
REpower	DFIG	12.6	950

발전기 형식 : Outer rotor PMSG

정격출력 : 3MW

정격전압 : 660V ~ 690V

정격회전속도 : 14 rpm

효율 : 94% 이상

역률 : 0.93 이상

F_d : 40 kN/m² 이상

여기서 정격 전압은 실효값(RMS)이며, F_d 는 전단응력(shear stress)를 말한다.

2.2 발전기 외형 설계

회전자 부피 : 회전자 부피를 구하기 위해서 우선 출력과 토크, 회전 속도 관계식을 이용하여 토크와 부피 관련 식을 유도한다.

$$P_{gen} = T_{gen} \omega = 2\pi r_g^2 l_s F_d \omega \quad (1)$$

여기서 P_{gen} [kW]은 발전기 출력, T_{gen} [kNm]은 발전기 토크, ω [rad/s]는 회전속도, r_g [m]는 기기의 반지름, l_s [m]는 축방향 길이, F_d 는 전단 응력(shear stress)[kN/m²]이다.

또한 발전기 토크는 다음의 관계식으로 표현할 수 있다.

$$T = (F_d 2\pi r_g l_s) r_g = F_d 2\pi r_g^2 l_s \quad (2)$$

위 식을 단위 회전자 부피 당 토크(torque per unit volume)로 나타낼 수 있다⁽³⁾.

$$TRV = \frac{T}{\pi r_g^2 l_s} = 2F_d \quad (3)$$

$$\frac{T}{2F_d} = \pi r_g^2 l_s \quad (4)$$

이 식을 이용하여 대략적인 회전자의 직경과 축 방향 길이를 선택 할 수 있다.

공극 : 공극은 통상적으로 공극직경에 비례하며 대형의 경우 0.1%에서 소형의 경우 1%까지에 이른다. 공극을 결정함에 있어서 운전시의 회전자, 고정자 사이의 온도차에 의한 열팽창의 차이, 베어링의 유격, 고정자의 기계적 가공/조립 오차 등이 고려되어야 한다⁽⁴⁾. 본 연구에서는 공극을 7mm로 정하였다.

극수 : 일반적으로 극수가 많아지면 발전기 무게가 줄어드는 것으로 알려져 있다⁽⁵⁾. 그 이유는 극수가 많아지게 되면 회전자나 고정자가 감당하여야 할 자속 밀도가 낮아지고 그에 따라서 회전자나 고정자의 무게를 감소시킬 수 있기 때문이다. 또한 자속의 형상이 정현파 모양에 가까워져 고조파 성분이 작아지고 철손이 작아지는 장점이 있다. 그러나 극수가 많아질 경우 주파수가 높아져 그에 따른 히스테리시스 손실이나 와전류 손실이 높아지고 전력변환장치의 스위칭 손실이 커질 수 있다.

자석 : 자석은 NdFeB(Neodymium Iron Boron) 자석을 사용하였다. NdFeB는 다른 희토류 자석보다 높은 잔류자속밀도와 보자력 특성을 가지는 장점이 있다. 반면 온도 조건에 취약하다는 단점이 있기 때문에 감자특성곡선을 통해 자석의 특성을 판단하여야 한다. 본 연구에서는 N40SH를 사용하였다⁽⁶⁾. 자석의 치수는 필요한 자속 밀도, 단락 사고시의 역자장에 의한 탈자 방지, 토크 맥동의 최적화 등에 의해서 결정하여야 한다. 따라서 본 연구에서는 자석 두께 25mm, 자석 폭 74mm로 정하였다.

전류 밀도 : 전류 밀도는 냉각 방식, 절연 등급, 차폐 방식에 따라 달라진다. 만약 전류 밀도가 너무 높으면 동손이 증가하고 냉각에 문제가 발생할 것이다. 또한 전류 밀도가 너무 낮으면 슬롯치의 강판 양과 축 방향 길이가 증가하게 될 것이다⁽⁷⁾. 따라서 적절한 전류 밀도의 선정이 중요하다. 본 논문에서는 해상 풍력 발전용을 고려하고 있으므로 염분과 습윤

Table 2. 설계한 3MW 외형 parameter

Parameters	Value	Unit
공극 직경	2,6	m
회전자 길이	1,2	m
공극	7	mm
극 수	81	pole pairs
슬롯 깊이	0,08	m
자석 높이	0,025	m
자석 너비	0,0733	m
슬롯 너비	17,5	mm
회전자 요크	140	mm
고정자 요크	50	mm
정격회전속도	14	rpm
정격주파수	18,9	Hz
한 코일 당 턴 수	4	turns
턴 당 도체 수	24	filaments/turn
전류 밀도	3,0	A/mm ²
q	1	
직렬회로 연결	9×9	

으로 인한 부식 방지를 위해 IP54 이상의 완전 밀폐형 발전기를 고려하고 있다. 또한 강제 수랭식 냉각을 고려하고 있다. 따라서 발전기 수명과 안정성 향상을 위해 전류밀도를 3.0 A/mm²로 정하였다.

권선 :

$$q = \frac{Q_s}{2p \times m} \quad (5)$$

q는 각 상과 극 당 슬롯의 수이고 Q_s는 슬롯 수, p는 극수(pole pairs), m은 상(phase) 수이다. 본 연구에서는 q=1로 정하였다. 이중 권선 구조로 winding pitch는 6/6 full pitch를 사용하였다. 이는 한 자석 주기에 3상이 모두 연결된 형태이다. 또한 한 상에는 24개 도체가 들어가며 6개 도체가 한 턴을 이룬다. 9개의 pole pair가 직렬로 연결되어 있으며 9개의 병렬로 묶여있다.

Table 2에 발전기 외형 설계에 대한 내용을 정리하였다.

2.3 FEM을 이용한 발전기 모델링

그림 1에서 보는 바와 같이 발전기 1주기(1/81 pole pairs)

를 모델링 한다. 정적 해석(static analysis)을 하기 때문에 슬롯 부분은 공기로 간주한다. 추후 슬롯 부분에 전류 밀도를 적용하여 에너지와 인덕턴스 등을 구한다. 1주기 모델링에서 경계 조건은 발전기 바깥을 둘러싸고 있는 공기 끝 부분의 자기 벡터 퍼텐셜 A_z 는 0 이다(Dirichlet boundary condition), 또한 모델링 왼쪽과 오른쪽의 노드를 커플링 시켜 주기조건을 적용

하였다(Neumann & Periodic boundary condition). 격자(Mesh)를 생성한 후, 자석 영역을 설정하여 N극과 S극 자석(magnetism)을 인가하였다. 이는 해석을 조금 더 용이하게 하기 위함이며 해석 시 자석의 위치를 변화시켜 그 결과를 확인한다. 공극과 고정자 슬롯 치(teeth)에서의 자속 밀도 분포를 조금 더 정확하게 보기위해 격자를 주위 보다 세밀하게 하였다.

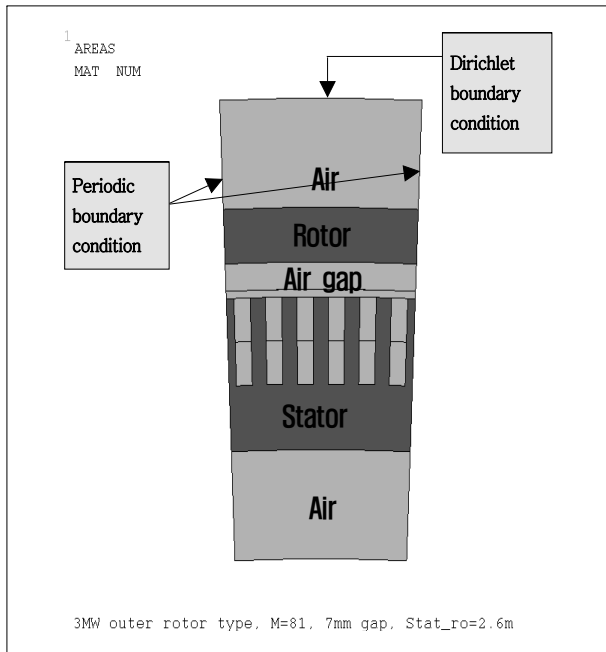


그림 1. 발전기 1주기 모델링과 경계 조건

3. Simulation Analysis

3.1 전자기장 해석

무부하 유도 전압 : 회전자를 회전시키면 그림 3에서와 같이 영구자석에 의해 자속 쇄교가 나타난다. 이때 얻은 자속을 다음식을 적용하여 무부하 상전압을 구한다.

$$V_{phase} = N_s \frac{d\Psi}{dt} = N_s \frac{d\Psi}{d\theta} \frac{d\theta}{dt} l_s \quad (6)$$

여기서 N_s 은 한 슬롯 당 턴 수, Ψ 는 자속, $d\theta/dt$ 는 각속도(ω)이다. 본 연구에서 Ψ 는 단위 길이 당 자속[Wb/m]으로 구하였으므로 식 (6)에서 축 방향 길이 l_s 를 곱하였다. 또한 식6 으로부터 선간전압을 구할 수 있다. 식 (7)에서 보는 바와 같이 3상 평형상태에서 각 상이 120도의 각을 이루고 있다는 특징을 이용하여 구할 수 있다.

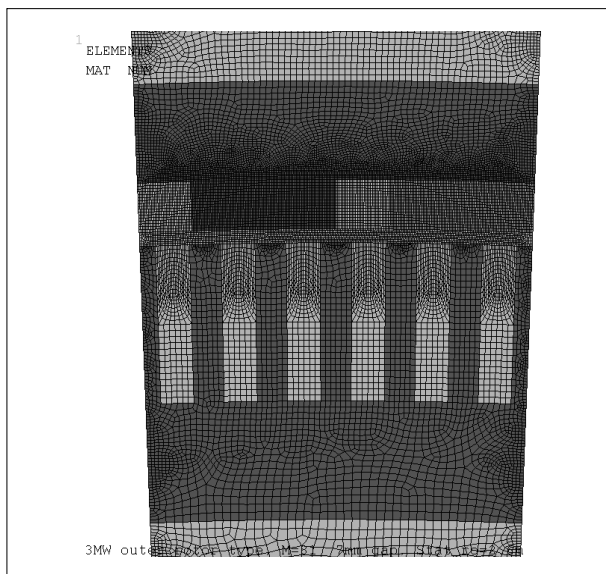


그림 2. 발전기 1주기 해석을 위한 격자 생성

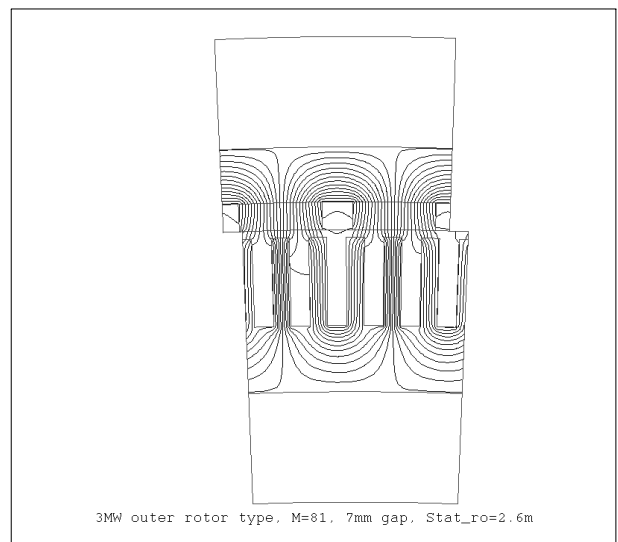


그림 3. 발전기 한 주기의 flux linkage

$$V_{line} = 2 V_{phase} \sin\left(\frac{\pi}{3}\right) = \sqrt{3} V_{phase} \quad (7)$$

전기각에 따른 상전압과 선간전압의 파형을 그림 4에 나타내었다.

공극 자속 밀도 : 표면 부착형 영구자석 기기의 최대 공극 자속 밀도는 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$B_m = \frac{B_r}{1 + \frac{\mu_r \delta k_c}{l_m}} [T] \quad (8)$$

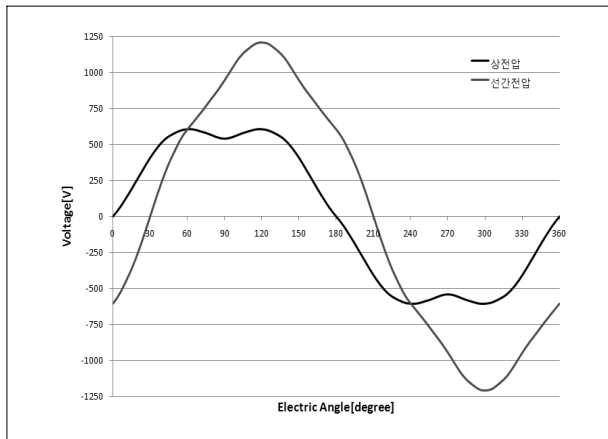


그림 4. 무부하 상전압과 선간전압

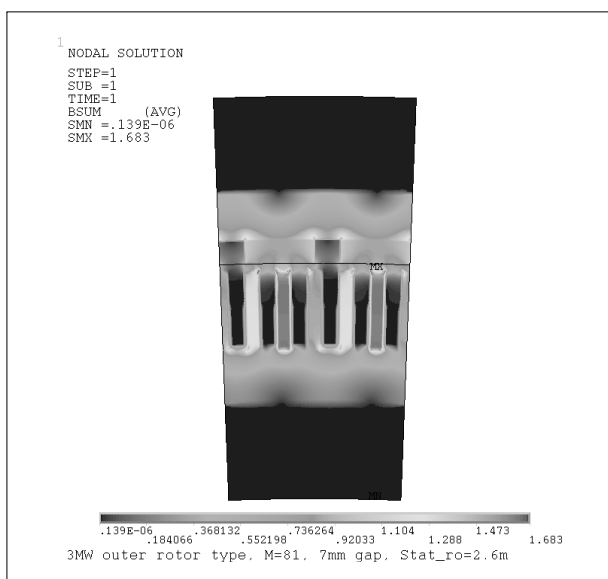


그림 5. FEM 해석에 의한 자속 밀도 분포도

여기서 B_r 은 자석의 잔류 자속밀도[T], μ_r 은 자석의 투자율, δ 는 공극 길이, k_c 는 cater factor, l_m 은 자석 두께이다.

FEM 해석을 통해 구해진 자속 분포가 Fig. 3.6에 나타나 있다. 또한 공극 자속 밀도가 Fig. 3.7에 나타나 있다. 공극 길이의 위치에 따라서 자속 밀도에 차이가 있다. 이는 슬롯의 형상에 의한 것으로 슬롯 개방 효과(slot opening effect)와 슬롯 모서리 효과(slot edge effect)를 확인할 수 있다. Fig. 3.7에서 나타난 공극 자속 밀도 파형의 기본파와 공극 자속 밀도는 0.92 Tesla 이다.

Skewing Effect : 코깁 토크와 고조파는 고정자 skewing 또는 회전자 자석 skewing에 의해서 줄일 수 있다. 고정자 skewing은 고정자의 한쪽 끝을 다른 쪽에 대해서 원하는 각도 만큼 비스듬하게 적층하는 것을 말한다. 일반적으로 한 슬롯 피치(slot pitch)를 skewing 하는 것을 full skewing이라 하는데 이 방법은 코깁 토크와 고조파를 줄이는데 효과적이다. 그러나 skewing은 제작 공정을 더 복잡하게 하고 따라서 추가 적 비용이 발생한다. 또한 고정자 skewing은 권선 설치가 복잡해 질 수 있고, 유효한 슬롯 면적이 줄어들고 도체길이가 증가한다. 따라서 고정자 저항이 증가하는 단점이 있다⁽⁸⁾.

본 연구에서는 한 슬롯 피치만큼 skewing 하였다. 즉, 전기각 60도 skewing을 적용하였다. 전기각 θ_e 에서의 skewing을 적용한 자속(flux)은 다음 식을 통해 구할 수 있다.

$$\Psi_{sk}(\theta_e) = \frac{1}{\gamma} \Psi_0 \sin(n\theta_e) \Big|_{-\frac{\gamma}{2}}^{\frac{\gamma}{2}} = \Psi_0 \frac{\sin(n\gamma/2)}{n\gamma/2} \quad (9)$$

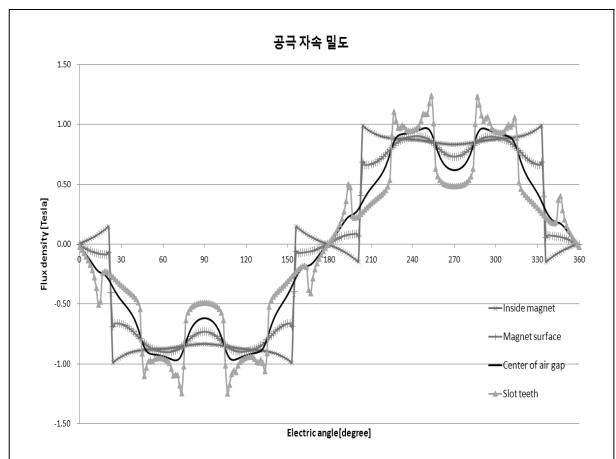


그림 6. 공극 위치에 따른 공극 자속 밀도

여기서 γ 는 skewing을 적용한 전기각, Φ_0 는 기존 전기각 θ_e 에서의 자속, n 은 고조파의 차수이다. 60도 skewing 하였으므로 계산하면 약 0.95의 값이 나온다. 이는 skewing 적용 시 자속이 5% 감소함을 알 수 있다. 그에 따른 전압의 감소를 그림 7을 통해 확인할 수 있다. Skewing전의 전압보다 정현파에 가까움을 알 수 있다.

Total Harmonic Distortion : 3.1.1과 3.1.3에서 구한 선간 전압을 푸리에 시리즈로 전개하여 기본파 전압에 대한 고조파의 비를 뜻하는 %THD를 구한다.

$$\%THD = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^{\infty} a_i^2}}{a_1} \times 100\% \quad (10)$$

여기서 a_1 은 기본파 전압, i 는 고조파 차수를 나타낸다. 그

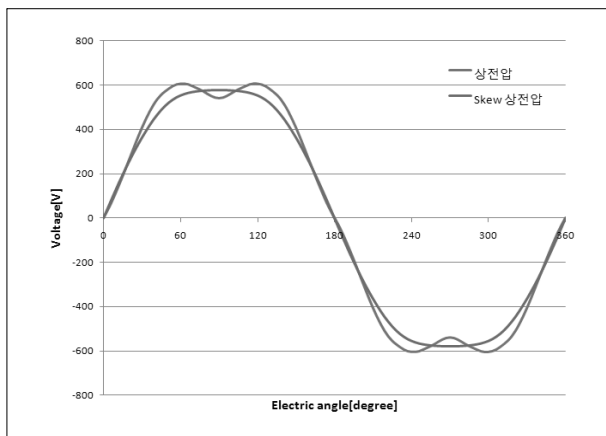


그림 7. Skewing 전과 후의 전압 파형 비교

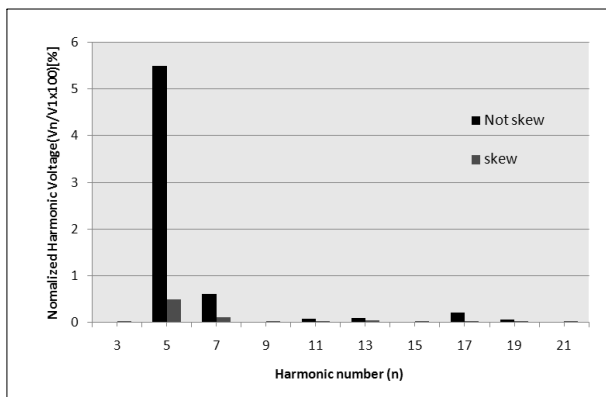


그림 8. Skewing 전과 후의 선간전압 고조파 비교

림 8은 skewing 전과 후의 선간전압의 기본파에 대한 각 고조파별 비율을 나타낸 것이다. Skewing 전 %THD는 5.52%이며 제 5 고조파가 99.1%를 차지한다. Skewing을 적용하였을 경우 %THD가 0.81%로 줄어드는 것을 확인하였다.

Cogging torque : 코깅 토크는 영구자석이 안정위치(aligned or detent position)에서 벗어남으로써 안정 위치로 복귀하려는 힘에 의하여 발생한다. 즉 자속은 자기저항(reluctance)이 최소가 되는 경로는 택하려는 경향으로 인해 발생하는 것이다. 이 토크의 변동 성분은 회전속도의 변동 성분을 발생 시킬 뿐만 아니라, 소음, 진동을 유발하게 된다⁽⁹⁾. 또한 코깅 토크는 부하의 상태와는 관계없이 오직 공극의 형상과 영구자석과 관계되는 힘이다. 본 연구에서는 FEM 분석을 통해 skewing 전의 코깅 토크를 구하였다. Full skewing을 통해 2차원적인 코깅 토크는 완전히 소거시킬 수 있으나 부분적으로 나타나는 권선 끝단(End winding)의 3차원 효과에 의한 코깅 토크를 최소화하기 위함이다. 자석의 폭이 자석 주기(pole pitch)의 73.3% 일 때 코깅 토크가 최소가 되었다.

3.2 손실 계산

동손 : 발전기에서의 손실은 크게 동손(copper loss)과 철손(iron loss; core loss)으로 분류 할 수있다. 본 연구에서 설계 한 발전기는 회전 속도가 낮으므로 손실은 동손(copper loss)이 대부분을 차지한다. 동손을 구하는 식은 다음과 같다.

$$P_{Cu} = \rho_{Cu} (\theta_{Cu}) J_s^2 V_{Cu} \quad (11)$$

여기서 $\rho_{Cu}(\theta_{Cu})$ 는 도체의 비저항, J_s 는 도체에서의 전류 밀도, V_{Cu} 는 도체의 부피이다. 또한 동손은 전류와 저항과의 관계식으로 나타낼 수 있다.

$$P_{Cu} = m I_a^2 R_a \quad (12)$$

철손 : 철손은 철심(core) 재료에 따른 자기이력 특성으로 인한 히스테리시스 손(Hysteresis loss)과 유도 전류로 인한 와전류 손(Eddy current loss)으로 나눌 수 있다. 히스테리시스 손실은 자성재료가 단위 시간당 히스테리시스 루프를 몇 회 회회하는가의 문제이며, 이는 주파수 f 와 자속밀도 B^a 에 비례한다. 그리고 와전류 손실은 주파수 증가에 따른 도전

성을 띤 재료의 기전력변화에 의한 와전류의 증가와 이에 따른 손실(V^2/R)에 기인하므로 f^2 과 B^2 에 각각 비례한다. 그러므로 정현파 자계의 크기와 주파수의 변화에 따른 철손식인 Steinmetz식은 다음과 같다.

$$P_c = P_{Hh} + P_{Rt} = k_h f B^n + k_e f^2 B^2 \tag{13}$$

여기서 f 는 발전기 주파수, B 는 자속밀도, k_h 와 k_e 는 각각 히스테리시스 손실 계수와 와전류 손실 계수, n 은 Steinmetz 상수로 이들 값을 결정하는 것이 가장 중요하다⁽¹⁰⁾. 따라서 본 연구에서는 조금 더 정확한 손실 계수(k_h , k_e)를 구하기 위해 코어 제조사에서 제공하는 core loss 표를 참고로 하여 발전기 주파수에 따른 core loss를 fitting하는 방법을 사용하였다. 식 (13)을 이용하여 core loss와 근접한 값을 갖도록 k_h 와 k_e 그리고 n 값을 조절하여 그래프로 나타내었다. 그 결과 $k_h=0.055$, $k_e=0.00071$, $n=2$ 일 때 core loss 곡선과 근사한 것으로 나타났다. 이 때 히스테리시스 손과 와전류 손실은 각각 2.34W/kg, 0.57W/kg으로 주파수가 낮음으로 인해 와전류 손실이 낮은 것을 알 수 있다.

위에서 구한 값을 바탕으로 참고 문헌에 나와 있는 고정자 요크와 슬롯 치(teeth)에서의 히스테리시스 손실과 와전류 손실을 구한다.

계산 결과 구하여진 손실을 정리하면 다음과 같다.

1. 동손 : 149.3kW
2. 고정자 요크 히스테리시스 손 : 24.6kW
3. 고정자 요크 와전류 손 : 1.8kW
4. 고정자 슬롯 치의 히스테리시스 손 : 9.5kW
5. 고정자 슬롯 치의 와전류 손 : 1.7kW
6. 추가적 손실 : 5.4kW

따라서 발전기의 손실은 약 192kW로 추정한다.

3.3 열 분석

3.2절에서 구한 손실을 적용한 2D 열분석을 수행한다. 슬롯 9개 당 냉각 2 채널을 적용한다. 이 경우 열전달 계수는 $6500W/m^2/K$ 이다. 슬롯 내부에 도체가 절연물에 쌓여 있고 그 도체들이 코일을 이룬다. 코일은 이중권선으로 슬롯 상,

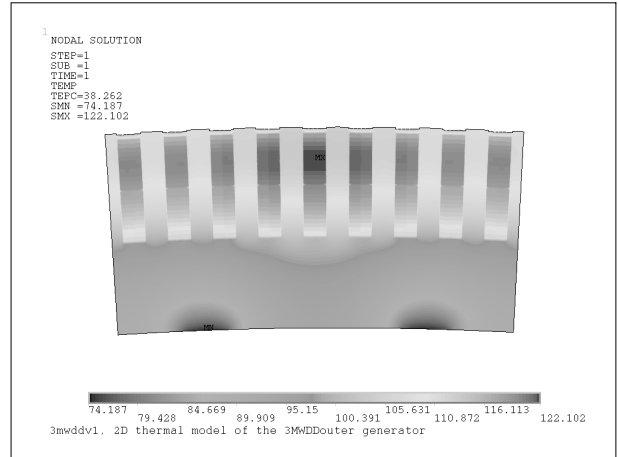


그림 9. 9 슬롯 2 냉각 채널의 열 분포

Table 3. 설계한 3MW outer rotor type PMSG

Parameters	Value	Unit	Remark
정격 출력	3137	kW	인버터 효율 96%
정격 전압	689.6	Vrms	선간전압
정격 전류	2797.2	Arms	
정격 토크	2140	kNm	
역률(PF)	0.939		
정격 주파수	18.9	Hz	
동기저항	6.259	mOhm	
동기인덕턴스	0.825	mH	
전류 밀도	3	A/mm ²	
회전속도	14	rpm	
고정자외경	2.6	m	
고정자길이	1.2	m	
극 수 pole pairs	81		
공극 길이	7	mm	
직병렬회로 연결 방법	9 × 9		
턴 수 turn/coil	4		
자석 두께	25	mm	
자석 폭	74	mm	
슬롯 깊이/폭	80/17.5	mm	
철손	43	kW	
동손	149.3	kW	
%THD	0.52	%	선간전압
코깅토크	0.8	%	정격 토크 대비
전단 응력	42	kN/m ²	
Active mass	28.9	ton	추정
효율	94.2	%	

하에 슬롯 wedge로 구분되어 배치된다. 2D 열분석을 위해 다음과 같은 가정을 세운다.

1. 고정자 내경은 열 접촉이 완벽하다.
2. 냉각수와 냉각관 사이의 열전달 계수는 $6500\text{W/m}^2/\text{K}$ 이다.
3. 도체 이외의 절연물과 wedge는 부도체의 열전도율을 갖는다.
4. 외기 온도는 40°C 를 기준으로 한다.
5. 냉각수 수량은 350 liter/min 이다.

위에서 세운 가정을 바탕으로 하여 2D 열분석을 수행한 결과가 그림 9에 나타나 있다. 냉각수의 온도 상승은 약 25°C 로 추정되고 냉각기 입구 온도 65°C 일 때 발전기 추정 온도 상승은 57°C 로 최대 코일 온도는 122°C 일 것으로 추정된다.

시뮬레이션 결과를 정리하면 Table 3과 같다.

4. Evaluation of designed PMSG

4.1 Active material mass

다른 영구자석 동기발전기와 비교를 통하여 설계한 발전기를 평가하고자한다. 그림 10은 참고문헌⁽¹¹⁾에 나와 있는 정격 토크에 따른 active material mass를 비교한 그래프 위에 설

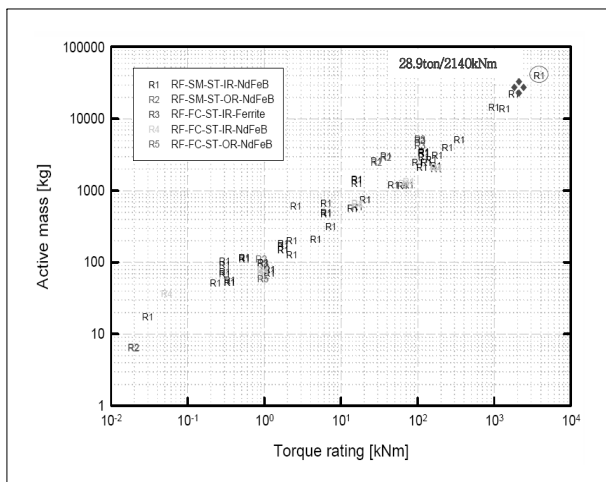


그림 10. 정격 토크에 따른 RFPM의 active mass

계한 발전기의 active material mass를 나타낸 것이다(빨간색 ❖표시). 설계된 발전기의 active material은 무게 $28.9[\text{ton}]$, 정격 토크 $2140[\text{kNm}]$ 로 그래프에 나타난 추세를 따르고 있음을 볼 수 있다.

또한 그림 11은 RFPM발전기의 토크에 대한 무게 비율을 정격 토크 크기에 따라 그래프로 나타낸 것이다. 설계한 발전기의 active material mass/torque rating 비율은 $13.5[\text{kg/kNm}]$ 로 추세를 따르고 있음을 확인할 수 있다(빨간색 ❖표시).

5. Conclusion

본 연구는 직접 구동형 풍력발전기를 위한 3MW급 외부 회전자형 영구자석 동기발전기를 설계하였다. FEM 프로그램인 ANSYS를 이용하여 전기자기장 해석과 열분석을 수행하였다.

설계 결과를 간략히 정리해 보면 정격 출력 3137kW , 정격 전압 690V , 정격 토크 2140kNm , 정격 회전속도 14rpm , 효율 94.2% 인 발전기이다. 설계 초기에 설정한 설계 목표치에 부합하고 있다. 설계 시 공극 길이, 전류 밀도, 손실 계수, 열전달 계수 등은 보수적인 값을 취하였다. 따라서 실제 발전기 제작에서는 설계한 결과 값보다 나은 출력과 효율을 가질 것이라 판단된다.

본 연구에서 적용한 발전기 설계 방법은 다음과 같다.

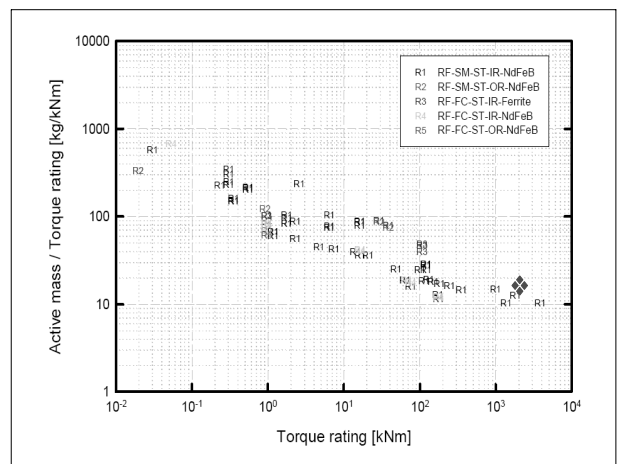


그림 11. 정격 토크에 대한 active mass 비율

1. 전단 응력과 공극 자속 밀도를 이용한 발전기 직경과 길이 선정
2. 발전기 한 주기 모델링을 통한 계산 시간 절감
3. 능동 제어를 통한 역률 개선
4. 고조파와 코깅 토크 저감을 위한 skewing 적용
5. 자석 폭 조절을 통한 코깅 토크 최적화
6. Core loss curve를 fitting하는 방법을 적용한 손실 계산
7. 정격 토크와 active material mass를 이용한 발전기 평가

후 기

본 연구는 포항공과대학교 풍력대학원 석사논문 일환으로 수행되었습니다.

References

[1] Henk Polinder, 2005, Comparison of Direct-Drive and Geared Generator Concepts for Wind Turbines, IEEE.
 [2] J.Pyrhonen, Permanent Magnet 3MW Low-Speed Generator

Development.
 [3] T.J.E. MILLER, 1989, Brushless Permanent -Magnet and Reluctance Motor Drives, CLARENDON PRESS · OXFORD
 [4] 김동연, 2007, 3MW 영구자석형 동기발전기의 공학설계, 한국풍력에너지학회 추계 학술대회.
 [5] F.Libert, 2004, Design Study of Different Direct-Driven Permanent-Magnet Motors for a Low Speed Application, ntnu.no
 [6] N40SH, ARNOLD MAGNETIC TECHNOLOGIES.
 [7] Sahin Funda, 2001, Design and development of a high-speed axial-flux permanent magnet machine, Technical University of Eindhoven.
 [8] E. Muljadi, 2002, COGGING TORQUE REDUCTION IN A PERMANENT MAGNET WIND TURBINE GENERATOR, National Wind Technology Center, NREL.
 [9] 고흥석, 2000, 영구자석을 사용한 모터의 코깅토크에 관한 이론적 해석, 대한기계 학회 논문집 A권, 제24권 제7호, pp. 1795-1800.
 [10] 장명석, 2006, 고속으로 운전되는 영구자석형 동기전동기의 철손 및 풍손 해석, 전기학회논문집 55B권 10호.
 [11] Deok-je Bang, 2010. Design of Transverse Flux Permanent Magnet Machines for Large Direct-Drive Wind Turbines, PhD thesis TU Delft.

김 태 훈



2002년 한국해양대학교 전기전자공학부 공학사

현재 포항공과대학교 풍력특성화대학원 석사과정
 (E-mail : dasari8@postech.ac.kr)